doi:10.13866/j.azr.2018.05.25

晋陕蒙典型化石能源开发区土地利用变化及其生态响应①

宋永永[1]， 薛东前[1]， 代兰海[1]， 夏四友[2]， 黄小刚[1]
（1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西 西安 710119；2. 南京师范大学地理科学学院，江苏 南京 210023）

摘 要：以晋陕蒙典型化石能源开发区——晋陕蒙接壤区为例，基于1995年、2000年、2005年、2010年和2015年5期土地利用遥感解译数据，采用土地利用转移矩阵模型和土地利用转型的生态响应模型，研究1995—2015年区域土地利用变化特征及其生态响应。结果表明：① 1995—2015年，研究区耕地和草地面积分别减少676 km^2 和1 808 km^2，林地、建设用地、水域和未利用地面积分别增加1 063 km^2、966 km^2、29 km^2 和426 km^2，耕地、草地和未利用地的相互转换是土地利用变化的主导类型。② 1995年以来，区域生态系统服务价值呈现增长态势，20 a间共增加了 1.86×10^{10} 元，其中林地、草地和水域的贡献最为突出。③ 近20 a，区域环境质量整体呈现先上升后下降的演变态势，在地域上存在恶化、稳定和改善3种演化类型，分别占区域总面积的21.89%、57.08%和21.03%。④ 水域、草地和林地的退化是区域环境质量恶化的主导因子，耕地和未利用地转换为草地、林地和水域，以及草地转换为林地和水域是区域环境质量改善的重要驱动因子。

关键词：土地利用；生态系统服务价值；环境质量；生态响应；化石能源开发区

土地利用变化是全球变化及可持续性科学研究的重要内容，是“国际地圈—生物圈计划”（IGBP）和“全球变化人文因素计划”（IHDP）及全球土地计划（GLP）等科学计划研究的核心领域[1]。新世纪以来，世界人口规模的急剧增长和社会经济的快速发展，深刻影响了全球土地利用格局，以人地耦合系统为核心的土地利用变化及其生态环境效应研究成为生态学、地理学和土地科学及其交叉学科在全球变化领域共同关注的热点和前沿。

土地利用变化是人类活动和自然环境演化对陆地表层系统环境作用的表征，是影响区域生态系统服务功能的重要驱动力[2]。生态系统服务功能的降低或退化直接影响着土地利用结构和效率，甚至危及区域乃至较大范围的生态安全[3]。20世纪90年代以来，国内外学者围绕土地利用变化及其生态环境效应开展了广泛的理论探索与实践研究，在土地利用变化的环境要素效应和综合生态效应方面取得了重要进展[4]。国外学者Costanza等[5]通过测算不同土地利用类型的生态系统服务功能，首次将土地利用变化与生态环境质量相连接，并定量探讨了土地利用变化及其生态环境效应。在此基础上，Polasky等[6]定量分析了明尼苏达州土地利用变化对生态系统服务、生物多样性和土地所有者收益的影响；Zorrilla等[7]揭示了土地利用变化对湿地生态系统服务功能的作用；Kremen等[8]构建了土地利用变化对流动生物授粉和生态系统服务影响的概念框架。由于土地利用及其生态系统服务类型具有地域差异性，国内学者谢高地等[9]参考Costanza等[5]的全球生态系统服务价值估算成果，建立了中国陆地生态系统单位面积服务价值表，为深入开展区域土地利用变化对生态环境的影响奠定了理论和方法基础。傅伯杰等[10-11]系统研究了黄土高原坡面尺度不同土地利用类型的生态系统服务功能，发现土地利用景观格局变化显著影响生态系统服务；杨依天等[12]从空间耦合角度揭示了和田绿洲1980—2010年土地利用变化空间耦合及其环境效应；吴蒙[13]研究了长三角地区土地利用格局变化对区域生态系统服务的影响；李俊等[14]探讨了沿黄地带城镇建设用

① **收稿日期：**2017-11-12； **修订日期：**2018-04-12
基金项目：国家科技基础性工作专项（2014FY210100）资助
作者简介：宋永永（1990-），男，博士研究生，主要研究方向为城市产业与城市社会、区域地理与可持续发展. E-mail：songyongyong2010@163.com
通讯作者：薛东前. E-mail：xuedq@snnu.edu.cn

地变化产生的生态效应。通过梳理已有文献可以发现:① 在研究尺度上,呈现出由国家、区域尺度向流域、城市尺度转变;② 在研究内容上,表现为由土地利用变化的气候、水文、土壤和生物多样性等单一要素的环境效应向土地利用变化的景观格局、生态系统服务流和生态系统服务价值等综合生态效应转变;③ 在研究方法上,由单一研究方法的定性分析向综合多种方法的定量研究转变,并集成了被广泛应用的土地利用变化模型与土地利用转型的生态响应模型[15-16]。但是关于典型生态脆弱区土地利用变化及其生态效应的研究主要集中在干旱内陆河流域、国家重点生态功能区等区域,对受人类活动干扰强度大的化石能源开发区土地利用变化及其环境响应研究依然薄弱,远不能满足区域能源资源开发与环境管控需要。

西部大开发战略实施以来,大规模资源开发和城镇化进程,使得晋陕蒙化石能源开发区原本十分脆弱的生态环境,承受了巨大的人类活动压力,土地利用格局变化剧烈,生态系统功能和结构变化显著,区域生态保护与环境治理面临严峻挑战。因此,本文选取晋陕蒙典型化石能源开发区——晋陕蒙接壤区为研究区,基于 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年 5 期土地利用数据,运用土地利用转移矩阵模型和土地利用转型的环境响应模型,定量研究 1995—2015 年区域土地利用变化过程及其特征,分析区域生态系统服务价值与环境质量演化规律,厘定土地利用类型转换对区域环境质量变化的贡献程度,以期为优化能源开发区土地利用结构、促进区域环境综合治理提供理论支撑和决策支持。

1 研究区概况

晋陕蒙接壤区地处我国北方农牧交错过渡地带,是黄土高原与库布齐沙漠、毛乌素沙地的交接地带,是典型的化石能源开发区。本文根据晋陕蒙接壤地区水土保持监督局管辖范围,选取山西省忻州市保德县、河曲县、偏关县和吕梁市兴县,陕西省榆林市榆阳区、横山区、府谷县和神木县,内蒙古鄂尔多斯市东胜区、准格尔旗、达拉特旗、伊金霍洛旗和呼和浩特市托克托县,共涉及 3 省(区)5 市 13 个县(区、旗),国土面积 5.44 × 10^4 km^2(图 1)。主要包括干旱草原区、风沙区、黄土丘陵沟壑区、土石山区和冲积平原区等5大地貌类型。该区气候干旱,多

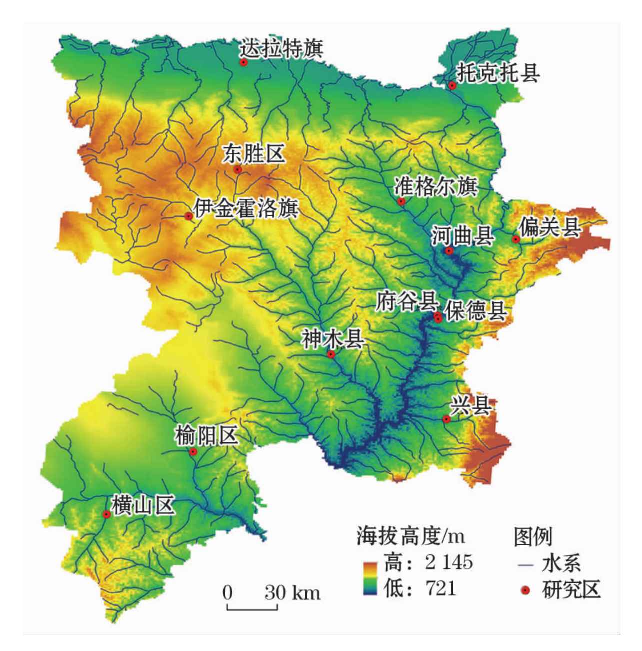


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Geographical location of the study area

大风天气,多年平均降水量 310 ~ 490 mm。区内有黄河一级支流十大孔兑流域和 17 条流域面积大于 1 000 km^2 的支流。现有水土流失面积 4.68 × 10^4 km^2,年平均输沙量 4.90 × 10^8 t。生态环境脆弱,自然灾害频发,能源战略地位突出。2015 年,全区总人口 3.99 × 10^6 人,其中农业人口 2.49 × 10^6 人,人口密度 73 人 · km^{-2}。实现地区生产总值 5.44 × 10^{11}元,其中工业总产值达到 3.88 × 10^{11}元。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

2.1.1 *数据来源* 本文选用的 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年土地利用类型数据由中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/first.asp)提供,该数据的生产制作是以各期 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源,通过人工目视解译生成,并通过野外实地调查开展精度验证,各期土地利用类型综合评价精度均在 94.3% 以上,满足研究对数据精度的要求[1]。同时参考中国科学院土地利用分类系统,结合晋陕蒙接壤区自然地理环境特征和社会经济发展实际,在 ArcGIS 10.2 软件支持下,通过重分类(reclassify)得到研究区 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的分布情况。粮食作物播种面积和产量数据来源于 1996—2016

年各县区统计年鉴,粮食销售价格数据来源于《中国粮食年鉴》。

2.1.2 生态系统服务价值确定 依据 Costanza 等[5]生态系统服务价值估算原理和谢高地等[17]制定的中国生态系统服务价值当量因子表,考虑到生态系统和生态系统服务的区域差异性,根据晋陕蒙接壤区实际情况,对单位面积农田生态系统每年粮食产量的经济价值进行修正,进而计算各地类的相对生态价值。首先,以 1995—2015 年研究区 13 个县域单元的平均粮食产量 3 088.33 kg·hm^{-2}代替各年份的粮食单产,以 2010—2015 年全国粮食平均出售价格 2.30 元·kg^{-1}作为研究期内的粮食价格,根据 1 个生态服务价值当量因子的经济价值量等于当年全国平均粮食单产市场价值的 1/7[9],计算出晋陕蒙接壤区生态系统服务价值当量因子为 1 014.74 元·hm^{-2};其次,计算研究区 6 种地类对应于谢高地等划分的中国陆地生态系统类型的生态系统服务价值系数;第三,根据各种土地利用类型生态系统服务价值系数的比例关系,计算各土地利用类型的相对生态价值(表 1)。

表 1 晋陕蒙接壤区各土地利用类型生态系统服务价值系数

Tab. 1 Coefficients of ecosystem service value of different land use types in the contiguous areas among Shanxi, Shaanxi and Inner Mongolia

/(元·hm^{-2}·a^{-1})

生态服务功能	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
食物生产	862.53	294.27	101.47	811.79	0.00	0.00
原料生产	405.90	669.73	142.06	233.39	0.00	0.00
水资源供给	20.29	345.01	81.18	8 412.19	0.00	0.00
气体调节	679.88	2 201.99	517.52	781.35	0.00	20.29
气候调节	365.31	6 595.81	1 359.75	2 323.75	0.00	0.00
净化环境	101.47	1 958.45	446.49	5 631.81	0.00	101.47
水文调节	273.98	4 809.87	994.45	103 747.02	0.00	30.44
土壤保持	1 045.18	2 689.06	629.14	943.71	0.00	20.29
维持养分循环	121.77	202.95	50.74	71.03	0.00	0.00
生物多样性	131.92	2 445.52	568.25	2 587.59	0.00	20.29
美学景观	60.88	1 075.62	253.69	1 917.86	0.00	10.15
合计	4 069.11	23 288.28	5 144.74	127 461.49	0.00	202.95
相对生态价值	0.026	0.145	0.032	0.796	0.000	0.001

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵用来刻画区域各类土地利用类型之间相互转换的数量关系,反映在人类活动作用下区域土地利用变化的方向及结构,揭示土地利用格局时空演化特征[12]。计算公式为:

$$S_{ij}=\begin{matrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{matrix} \tag{1}$$

式中:S 表示土地面积;n 表示土地利用类型数;i 和 j 分别表示研究初期和研究末期的土地利用类型。本文在 ArcGIS 10.2 软件中对不同时期土地利用类型数据进行空间叠加分析,进而用 Excel 数据透视表处理,获取各期土地利用类型面积转移矩阵。

2.2.2 土地利用变化的生态响应模型

(1) 区域环境质量指数 综合考虑各类土地利用类型的面积占比和相对生态价值,定量表达区域环境质量的总体状态[18]。计算公式为:

$$EV_t=\sum_{i=1}^{n}LU_i\cdot V_i/TA \tag{2}$$

式中:EV_t 表示环境质量指数;LU_i 和 V_i 分别表示第 i 种土地利用类型面积和其相对生态价值;TA 表示区域总面积;n 为土地利用类型数量。

(2) 土地利用变化的生态贡献率 其是表征某种土地利用类型转换引起区域环境质量变化程度的指标[19]。计算公式为:

$$C_{i\to j}=\frac{(LE_j-LE_i)\times At_{i\to j}}{\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}\left|(LE_j-LE_i)\times At_{i\to j}\right|}\times 100\% \tag{3}$$

式中:$C_{i\to j}$表示第 i 地类转换为 j 地类时的生态贡献率;LE 表示研究时段内某种土地利用类型的环境质

量指数;$At_{i\to j}$表示第 i 地类转换为 j 地类的面积占区域总面积的比重;n 表示土地利用转移类型数量。当 $C_{i\to j}>0$ 时,说明土地利用类型转换改善了环境质量;当 $C_{i\to j}<0$ 时,说明土地利用类型转换造成生态环境退化。

3 结果与分析

3.1 土地利用类型变化特征

1990—2015 年晋陕蒙接壤区土地利用类型结构发生较大变化(表 2)。具体可从 4 个时段分别考察:① 1995—2000 年区域土地利用的总体趋势是林地、水域和未利用地增加,耕地、草地和建设用地减少,其中草地、未利用地和林地变化最为剧烈,草地和耕地分别减少了 1 295 km² 和 335 km²,未利用地增加了 868 km²。② 2000—2005 年,林地和耕地面积变化较大,林地增加了 357 km²,年均变化幅度为 1.99%,耕地减少了 304 km²,年均变化幅度为 0.44%。这与退耕还林政策的实施和“三北防护林”工程建设密切相关。草地、水域和未利用地分别减少了 43 km²、42 km² 和 70 km²,建设用地增加了 102 km²。③ 2005—2010 年,草地面积显著增加,由 2005 年的 27 031 km² 增加至 2010 年的 27 145 km²,年均变化幅度为 0.08%;耕地和未利用地分别减少了 35 km² 和 135 km²,建设用地增加了 33 km²。④ 2010—2015 年,建设用地迅速扩张,由 2010 年的 840 km² 增加为 2015 年 1 676 km²,年均变化幅度达到 19.90%;草地和未利用地面积分别减少了 584 km² 和 237 km²;耕地、林地和水域面积变化不大。主要是因为 2010 年以来,快速城镇化和大规模能矿资源开发,致使城乡、居民和工矿建设用地规模急剧扩大。

3.2 土地利用类型转移方向

1995—2015 年,晋陕蒙接壤区土地利用类型发生了明显的相互转化,耕地、草地和未利用地的相互转换最为显著(表 3)。具体表现出以下特点:1995—2000 年,草地转为其他地类的面积为 9 770 km²,其中 55.92% 转化为耕地,27.59% 转化为未利用地,而仅有 8 475 km² 的其他地类转化为草地,致使 2000 年草地面积减少 1 295 km²。2000—2005 年,草地的转出量最大,转出面积 582 km²,主要转为林地、未利用地和耕地,转出率分别为 39.00%、24.40% 和 22.00%,仅有 539 km² 其他地类转化为草地,草地面积继续减少;林地的转入量较大,转入面积 452 km²,主要由草地和耕地转入,转入率分别为 50.22% 和 38.94%。2005—2010 年,未利用地转出量最大,转出面积 140 km²,其中 85% 转化为草地,7.14% 转化为耕地;草地转入量最大,转入面积 155 km²,主要由未利用地转入,转入率为 76.77%;建设用地转入量较大(34 km²),主要由草地和耕地转入,转入率分别为 61.76% 和 26.47%。2010—2015 年,草地转为其他地类的面积为 743 km²,转出面积最大,其中 69.31% 转化为建设用地,13.19% 转化为耕地,仅有 159 km² 其他地类转化为草地,草地面积持续减少;建设用地转入量最大(851 km²),主要由草地、未利用地和耕地转入,转入率分别为 60.52%、16.57% 和 15.04%。

3.3 土地利用变化的生态环境响应

3.3.1 生态系统服务价值变化 根据表 1 计算 1995—2015 年晋陕蒙接壤区生态系统提供的服务价值(图 2)。由图 2 可知,研究期内区域生态系统服务价值整体呈现上升趋势,由 1995 年的 4.38×10^{10} 元增加至 2015 年的 6.24×10^{10} 元,20 a 间增加了 1.86×10^{10} 元,年均增长率为 1.79%,这主要得益于“退耕还林(草)”和“禁牧封育”等工程的实施,有效促进了区域生态环境的保育和修复。其中 2005—2010 年增幅最大,达到 1.59×10^{10} 元,年均增

表 2 1995—2015 年研究区土地利用类型结构变化

Tab.2 Change of the structure of land use types in the study area during the period of 1995—2015

土地利用类型	1995 年		2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
耕地	14 092.00	25.96	13 757.00	25.35	13 453.00	24.79	13 418.00	24.72	13 416.00	24.72
林地	2 891.00	5.33	3 594.00	6.62	3 951.00	7.28	3 968.00	7.31	3 954.00	7.28
草地	28 369.00	52.27	27 074.00	49.88	27 031.00	49.80	27 145.00	50.01	26 561.00	48.94
水域	1 305.00	2.40	1 369.00	2.52	1 327.00	2.44	1 333.00	2.46	1 334.00	2.46
建设用地	710.00	1.31	705.00	1.30	807.00	1.49	840.00	1.55	1 676.00	3.09
未利用地	6 909.00	12.73	7 777.00	14.33	7 707.00	14.20	7 572.00	13.95	7 335.00	13.51

表 3 1995—2015 年研究区土地利用类型转移矩阵

Tab. 3 Transition matrix of land use types in the study area during the period of 1995—2015 /km^2

研究时段	地类	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计
1995 - 2000 年	耕地	7 043.00	584.00	5370.00	281.00	245.00	569.00	14 092.00
	林地	411.00	1 519.00	780.00	26.00	33.00	122.00	2 891.00
	草地	5 464.00	1 153.00	18 599.00	285.00	172.00	2 696.00	28 369.00
	水域	228.00	29.00	251.00	669.00	19.00	109.00	1 305.00
	建设用地	215.00	16.00	201.00	32.00	188.00	58.00	710.00
	未利用地	396.00	293.00	1 873.00	71.00	48.00	4 228.00	6 909.00
2000 - 2005 年	耕地	13 270.00	176.00	252.00	18.00	27.00	14.00	13 757.00
	林地	14.00	3 499.00	57.00	5.00	13.00	6.00	3 594.00
	草地	128.00	227.00	26 492.00	31.00	54.00	142.00	27 074.00
	水域	31.00	11.00	52.00	1 261.00	1.00	13.00	1 369.00
	建设用地	1.00	1.00	1.00	0.00	702.00	0.00	705.00
	未利用地	9.00	37.00	177.00	12.00	10.00	7 532.00	7 777.00
2005 - 2010 年	耕地	13 394.00	17.00	25.00	6.00	9.00	2.00	13 453.00
	林地	0.00	3 942.00	9.00	0.00	0.00	0.00	3 951.00
	草地	6.00	9.00	26 990.00	2.00	21.00	3.00	27 031.00
	水域	8.00	0.00	2.00	1 317.00	0.00	0.00	1 327.00
	建设用地	0.00	0.00	0.00	1.00	806.00	0.00	807.00
	未利用地	10.00	0.00	119.00	7.00	4.00	7 567.00	7 707.00
2010 - 2015 年	耕地	13 209.00	15.00	40.00	20.00	128.00	6.00	13 418.00
	林地	36.00	3 836.00	38.00	3.00	47.00	8.00	3 968.00
	草地	98.00	54.00	26 402.00	19.00	515.00	57.00	27 145.00
	水域	14.00	4.00	14.00	1 279.00	20.00	2.00	1 333.00
	建设用地	4.00	1.00	8.00	1.00	824.00	2.00	840.00
	未利用地	56.00	44.00	59.00	12.00	141.00	7 260.00	7 572.00

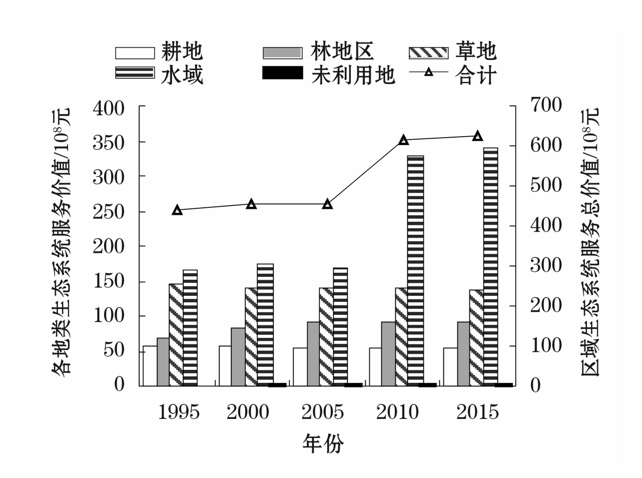


图 2 1995—2015 年研究区生态系统服务价值变化

Fig. 2 Change of ecological service value in the study area during the period of 1995—2015

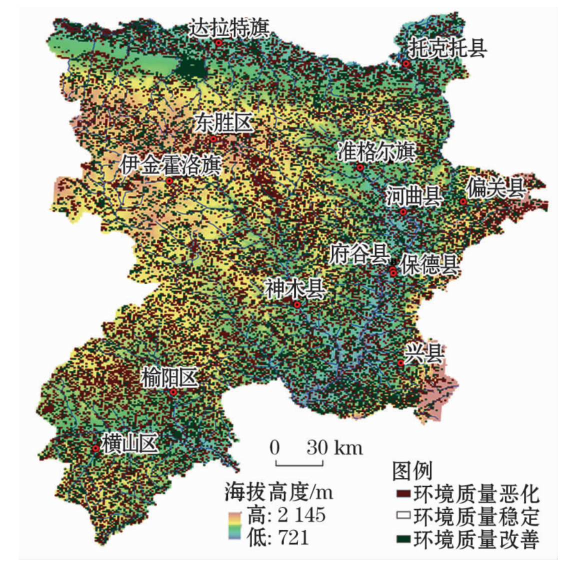
长率为 6.15%。从各地类生态系统服务价值变化看,1995—2015 年,耕地生态系统服务价值呈持续下降趋势,年均下降 1 375.36 元,其中 1995—2000 年下降幅度最大,占总减少量的 49.56%,这与晋陕蒙接壤区水土保持监督执法工作的落实和退耕还林(草)政策的实施有关;林地生态系统服务价值整体呈增长态势,20 a 间增长了 24.76 × 10^8 元,但受土地利用变化影响,2010—2015 年出现下降态势;草地生态系统服务价值总体呈下降趋势,年均下降 4 050.84元;水域和未利用地生态系统服务价值整体呈增长趋势,年均增长率分别为 3.64% 和 0.30%。上述变化表明不同时段人类经济社会发展,对区域生态系统的作用强度、方式和对土地资源需求不断变化,促使区域土地利用格局发生显著变化,生态系统服务功能得到优化和提升。

3.3.2 区域环境质量变化 1995—2015 年晋陕蒙接壤区环境质量指数由 0.050 4 增加至 0.052 3,年均上升 0.19%(表 4),表明区域环境质量整体趋于改善。其中,1995—2000 年,区域环境质量指数上升了 0.001 9,年均增长率为 0.74%;2000—2005 年,区域环境质量指数上升了 0.000 2,年均增长率为 0.08%;2005—2010 年,区域环境质量指数稳步增加,达到 0.052 7;2010—2015 年,区域环境质量指数由 0.052 7 下降为 0.052 3,下降幅度为 0.000 4。以上变化表明,近 20 a 来晋陕蒙接壤区环境质量整体改善,生态系统结构和功能不断优化。

表 4　1995—2015 年研究区环境质量指数

Tab. 4　Indices of environment quality in the study area during the period of 1995—2015

	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计
1995 年	0.006 6	0.007 7	0.016 8	0.019 1	0.000 0	0.000 2	0.0504
2000 年	0.006 4	0.009 6	0.016 0	0.020 1	0.000 0	0.000 2	0.052 3
2005 年	0.006 3	0.010 6	0.016 0	0.019 5	0.000 0	0.000 2	0.052 5
2010 年	0.006 3	0.010 6	0.016 1	0.019 5	0.000 0	0.000 2	0.052 7
2015 年	0.006 3	0.010 6	0.015 7	0.019 6	0.000 0	0.000 2	0.052 3
1995 - 2000 年	-0.000 2	0.001 9	-0.000 8	0.000 9	0.000 0	0.000 0	0.001 9
2000 - 2005 年	-0.000 1	0.001 0	0.000 0	-0.000 6	0.000 0	0.000 0	0.000 2
2005 - 2010 年	0.000 0	0.000 0	0.000 1	0.000 1	0.000 0	0.000 0	0.000 2
2010 - 2015 年	0.000 0	0.000 0	-0.000 4	0.000 0	0.000 0	0.000 0	-0.000 4
1995 - 2015 年	-0.000 3	0.002 8	-0.001 1	0.000 4	0.000 0	0.000 0	0.001 9



注：以研究区海拔分布图作为底图，设置 75% 透明度与环境质量变化图进行叠置显示，其中环境质量稳定型分布最广，作为背景设置为透明，因此不可见。

图 3　1995—2015 年研究区环境质量变化空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of environment equality in the study area during the period of 1995—2015

特别是 1995—2010 年，环境质量指数持续增加，说明该时段内区域生态环境不断向好。但 2010—2015 年，受人类社会经济活动影响，区域内大面积草地和林地转化为建设用地，部分地区水域面积萎缩，环境质量下降，生态系统出现退化趋势。

1995—2015 年晋陕蒙接壤区环境质量变化在空间上具有明显的地域差异性(图 3)。区域内环境质量变化存在恶化($EV_{2015}-EV_{1995}<0$)、稳定($EV_{2015}-EV_{1995}=0$)和改善($EV_{2015}-EV_{1995}>0$)3 种演化类型，其中环境质量稳定型面积最大，占区域总面积的 57.08%，环境质量恶化型与改善型面积相当，分别占区域总面积的 21.89% 和 21.03%。受地形影响，坡度较陡的地区林草恢复较好，环境质量改善明显，如位于研究区东部的黄土丘陵沟壑区，特别是黄河谷地，在退耕还林(草)政策驱动下，林草地面积显著增加；地形相对平缓区域，耕地、居民点和城镇建设用地人口密集，人类活动干扰强度大，生态系统退化明显，如东胜区、伊金霍洛旗、榆阳区、横山区和偏关县东部地区，环境质量出现恶化趋势。同时受河流水系影响，水域面积较大地区环境质量改善明显，如位于达拉特旗的黄河一级支流十大孔兑流域，生态恢复和环境质量趋于改善，说明水资源在农牧交错过渡地带生态恢复和环境改善中发挥着重要作用，水域面积的扩大(缩小)极易引起区域环境质量的改善(恶化)。

3.3.3　土地利用变化的生态贡献率分析　1995—2015 年，晋陕蒙接壤区土地利用类型转换对区域环境质量变化的贡献显著，环境质量改善与恶化交互出现($|C_{i\to j}|\geq 1$)(表 5)。1995—2000 年，土地利用变化对区域环境质量起改善作用的贡献率(53.19%)高于对环境质量起恶化作用的贡献率(-46.81%)，林地、草地和水域的增加是环境质量改善的主要驱动力。其中，草地转换为水域是环境质量改善的首要驱动因素，占总改善贡献率的 23.45%。2000—2005 年，土地利用变化对环境质量起改善作用的贡献率为 52.24%，高于对环境质量起恶化作用的贡献率(-47.76%)，环境质量持续向好；2005—2010 年，未利用地转换为草地和水域，以及耕地转换为水域是区域环境质量改善的主要驱动因素，占总改善贡献率的 70.51%，而水域、草地和林地的退化是区域环境质量恶化的主要驱动力，占总恶化贡献率的 95.84%；2010—2015 年，土地利用变化对区域环境质量起改善作用的贡献率

表 5　1995—2015 年研究区土地利用类型转换对区域环境质量变化的贡献率

Tab. 5　Contribution rates of transition of the main land use types to environment quality in the study area during the period of 1995—2015

时段	土地利用转换类型	改善贡献率/%	土地利用转换类型	恶化贡献率/%	时段	土地利用转换类型	改善贡献率/%	土地利用转换类型	恶化贡献率/%
1995-2000 年	未利用地→林地	2.51	水域→耕地	-10.46	2005-2010 年	未利用地→草地	12.47	水域→耕地	-20.94
	未利用地→草地	3.44	水域→林地	-1.12		未利用地→水域	18.89	水域→草地	-5.19
	未利用地→水域	3.36	水域→草地	-11.41		建设用地→水域	2.70	草地→建设用地	-2.29
	建设用地→水域	1.52	水域→未利用地	-5.15		草地→林地	3.46	林地→草地	-3.46
	草地→林地	7.77	草地→耕地	-1.77		草地→水域	5.19		
	草地→水域	12.95	草地→未利用地	-4.95		耕地→林地	6.93		
	林地→水域	1.01	林地→耕地	-2.94		耕地→水域	15.70		
	耕地→林地	4.17	林地→草地	-5.26	2010-2015 年	未利用地→林地	4.50	水域→耕地	-7.65
	耕地→草地	2.15	林地→未利用地	-1.05		未利用地→草地	1.29	水域→林地	-1.84
	耕地→水域	12.89				未利用地→水域	6.76	水域→草地	-7.58
2000-2005 年	未利用地→林地	2.53	水域→耕地	-11.34		草地→林地	4.34	水域→建设用地	-11.29
	未利用地→草地	2.59	水域→林地	-3.40		草地→水域	10.29	水域→未利用地	-1.13
	未利用地→水域	4.53	水域-草地	-18.85		林地→水域	1.38	草地→建设用地	-11.73
	草地→林地	12.21	水域→未利用地	-4.90		耕地→林地	1.28	草地→未利用地	-1.25
	草地→水域	11.24	草地→未利用地	-2.08		耕地→水域	10.93	林地→耕地	-3.06
	林地→水域	1.54	林地→草地	-3.06				林地→草地	-3.05
	耕地→林地	10.02						林地→建设用地	-4.85
	耕地→水域	6.58						耕地→建设用地	-2.31

(42.84%)小于对环境质量起恶化作用的贡献率(57.16%),水域、草地、林地和耕地的退化是导致区域环境质量恶化的主要因子,累积恶化贡献率为55.74%,占总恶化贡献率的97.52%,而未利用地转换是区域环境质量改善的首要驱动因子,累积改善贡献率为12.55%,占总改善贡献率的29.30%。上述分析表明,晋陕蒙接壤区环境质量改善的主要驱动因子是耕地和未利用地转换为草地、林地和水域,以及草地转换为林地和水域,而水域、草地和林地的退化是造成区域环境质量恶化的不利因子。因此,加强林地和草地保护,合理利用水土资源,根据区域实际改善未利用地的用地现状,是促进区域环境质量改善的重要途径。

4　结论与讨论

(1)1995—2015 年,晋陕蒙接壤区土地利用结构变化显著。耕地面积呈现持续减少趋势,草地面积呈现波动减少趋势,林地面积表现为先快速增加后小幅减少态势,建设用地面积呈现先减少后持续增加的变化态势,水域和未利用地面积呈现波动增加趋势。具体表现为:耕地和草地面积分别减少 676 km^2 和 1 808 km^2,林地、建设用地、水域和未利用地面积分别增加 1 063 km^2、966 km^2、29 km^2 和 426 km^2,其中耕地、草地和未利用地的相互转换是土地利用变化的主导类型。

(2)土地利用变化是区域生态系统服务功能与环境质量变化的重要驱动力。1995 年以来,随着土地利用结构变化,晋陕蒙接壤区生态系统服务价值呈增长态势,20 a 间生态系统服务价值增加了 1.86×10^{10} 元,年均增长率为 1.79%;环境质量整体呈现先上升后下降的演进态势,在地理空间上存在恶化、稳定和改善 3 种演化类型,其中环境质量稳定型面积分布最广,恶化型与改善型面积相当。出现这种变化的主要原因在于,20 世纪 80 年代末期国家设立晋陕蒙接壤地区资源开发与环境保护机构,统筹推进区域水土保育和生态恢复,特别是 2000 年以来,退耕还林(草)工程和全面禁牧政策等的实施,区域生态恢复效果明显。但区域内部环境整体改善、局部恶化的趋势并未得到根本扭转[20],2010 年以来,区域城市化和工业化的快速推进,新城新区建设、农村居民点用地扩张和矿产资源开发与不利的自然环境因素相叠加,造成林地面积减少、草地退化、湿地萎缩等问题,区域环境质量出现下降趋势。

(3)土地利用转型对区域环境质量变化的贡献显著。水域、草地和林地的退化是区域环境质量恶化的主导因子,耕地和未利用地转换为草地、林地和

水域，以及草地转换为林地和水域是环境质量改善的重要驱动因素。因此，可以通过加强林地和草地资源的保护与管理、合理开发利用水土资源、提高耕地资源集约利用水平、推进能源矿区生态恢复与土地修复等途径改善区域环境质量。

本文通过生态系统服务价值将土地利用变化与区域环境质量相连接，分析了区域土地利用变化与环境质量演化规律，厘定了各类土地利用类型转换对区域环境质量变化的贡献程度。但受研究尺度、地理环境地域差异性及粮食价格波动等因素的影响，采用生态系统服务价值系数法计算的土地利用类型生态系统服务价值具有一定的相对性，并且随着城市化和工业化的推进，人类对各土地利用类型的需求也在变化[14,21]，因此，生态系统服务价值计算方法的改进、环境质量指数的更新，以及环境质量变化驱动因素的揭示仍需进一步研究。

参考文献(References)：

〔1〕 刘纪远，匡文慧，张增祥，等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局〔J〕. 地理学报，2014，69(1)：3－14.〔Liu Jiyuan，Kuang Wenhui，Zhang Zengxiang，et al. Spatiotemporal characteristics，patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s〔J〕. Acta Geographica Sinica，2014，69(1)：3－14.〕

〔2〕 吴琳娜，杨胜天，刘晓燕，等. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应〔J〕. 地理学报，2014，69(1)：54－63.〔Wu Linna，Yang Shengtian，Liu Xiaoyan，et al. Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River basin since 1976〔J〕. Acta Geographica Sinica，2014，69(1)：54－63.〕

〔3〕 Gascoigne W R，Hoag D，Koontz L，et al. Valuing ecosystem and economic services across land-use scenarios in the Prairie Pothole Region of the Dakotas，USA〔J〕. Ecological Economics，2011，70(10)：1 715－1 725.

〔4〕 王晓东，蒙吉军. 土地利用变化的环境生态效应研究进展〔J〕. 北京大学学报：自然科学版，2014，50(6)：1 133－1 140.〔Wang Xiaodong，Meng Jijun. Research progress on the environmental-ecological impacts of land use change〔J〕. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis，2014，50(6)：1 133－1 140.〕

〔5〕 Costanza R，Arge R，Groot R，et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital〔J〕. Nature，1997，386(8)：253－260.

〔6〕 Polasky S，Nelson E，Pennington D，et al. The impact of land-use change on ecosystem services，biodiversity and returns to landowners：a case study in the state of minnesota〔J〕. Environmental and Resource Economics，2011，48(2)：219－242.

〔7〕 Zorrilla-Miras P，Palomo I，Gómez-Baggethun E，et al. Effects of land use change on wetland ecosystem services：A case study in the Doñana marshes(SW Spain)〔J〕. Landscape and Urban Planning，2014，122(2)：160－174.

〔8〕 Kremen C，Williams N M，Aizen M A，et al. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms：A conceptual framework for the effects of land-use change〔J〕. Ecology Letters，2007，10(4)：299 －314.

〔9〕 谢高地，鲁春霞，冷允法，等. 青藏高原生态资产的价值评估〔J〕. 自然资源学报，2003，18(2)：189－196.〔Xie Gaodi，Lu Chunxia，Leng Yunfa，et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau〔J〕. Journal of Natural Resources，2013，18(2)：189－196.〕

〔10〕 傅伯杰，张立伟. 土地利用变化与生态系统服务：概念、方法与进展〔J〕. 地理科学进展，2014，33(4)：441－446.〔Fu Bojie，Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services：Concepts，methods and progress〔J〕. Progress in Geography，2014，33(4)：441－446.〕

〔11〕 张琨，吕一河，傅伯杰. 黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响〔J〕. 生态与农村环境学报，2017，33(1)：23－31.〔Zhang kun，Lv Yihe，Fu Bojie. Vegetation restoration and its influences on ecosystem services in areas typical of the Loess Plateau〔J〕. Journal of Ecology and Rural Environment，2017，33(1)：23－31.〕

〔12〕 杨依天，郑度，张雪芹，等. 1980—2010 年和田绿洲土地利用变化空间耦合及其环境效应〔J〕. 地理学报，2013，68(6)：813－824.〔Yang Yitian，Zheng Du，Zhang Xueqin，et al. The spatial coupling of land use changes and its environmental effects on Hotan oasis during 1980－2010〔J〕. Acta Geographica Sinica，2013，68(6)：813－824.〕

〔13〕 吴蒙. 长三角地区土地利用变化的生态系统服务响应与可持续性情景模拟研究〔D〕. 上海：华东师范大学，2017.〔Wu Meng. Study on the Response of Ecosystem Services to Land use Change and the ScenarioSimulation of Land Use Sustainability in Yangtze River Delta〔D〕. Shanghai：East China Normal University，2017.〕

〔14〕 李俊，董锁成，毛琦梁，等. 宁蒙沿黄地带城镇用地变化及其生态效应〔J〕. 干旱区研究，2016，33(6)：1 262－1 269.〔Li Jun，Dong Suocheng，Mao Qiliang，et al. Urban land change and its ecological effect in the areas along the Yellow River in Ningxia Hui and Inner Mongolia autonomous regions〔J〕. Arid Zone Research，2016，33(6)：1 262－1 269.〕

〔15〕 于淼，吕晓，廉丽姝，等. 江苏省沿海地区土地利用变化及其生态效应〔J〕. 水土保持通报，2017，37(3)：1－9.〔Yu Miao，Lv Xiao，Lian Lishu，et al. Land use changes and its ecology effects in coastal region of Jiangsu province〔J〕. Bulletion of Soil and Water Conservation，2017，37(3)：1－9.〕

〔16〕 杜金龙，朱记伟，解建仓，等. 近 25 a 关中地区土地利用及其景观格局变化〔J〕. 干旱区研究，2018，35(1)：217－226.〔Du Jinlong，Zhu Jiwei，Xie Jiancang，et al. Changes of land use and landscape pattern in the Guanzhong area in recent 25 years〔J〕. Arid Zone Research，2018，35(1)：217－226.〕

〔17〕 谢高地，张彩霞，张雷明，等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进〔J〕. 自然资源学报，2015，30(8)：1 243－1 255.〔Xie Gaodi，Zhang Caixia，Zhang Leiming，et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area〔J〕. Journal of Natural Resources，2015，30(8)：1 243－1 255.〕

〔18〕 吕立刚，周生路，周兵兵，等. 区域发展过程中土地利用转型及其生态环境响应研究——以江苏省为例〔J〕. 地理科学，2013，

33(12):1 442 - 1 449.〔Lv Ligang, Zhou Shenglu, Zhou Bingbing, et al. Land use transformation and its eco-environmental response in process of the regional development: A case study of Jiangsu province〔J〕. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(12): 1 442 - 1 449.〕

〔19〕巩杰,钱彩云,钱大文. 1977—2013 年疏勒河中下游土地利用变化与环境响应〔J〕. 干旱区研究, 2017, 34(4): 775 - 781.〔Gun Jie, Qian Caiyun, Qian Dawen. Land use change and response of environment in the middle-lower reaches of the Shule river basin during the period of 1977 - 2013〔J〕. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 775 - 781.〕

〔20〕吕辉红,王文杰,谢炳庚. 晋陕蒙接壤区典型生态过渡带景观变化遥感研究〔J〕. 环境科学研究, 2011, 14(6): 50 - 53.〔Lv Huihong, Wang Wenjie, Xie Binggeng. A study on landscape changes of ecotone in contiguous area of Shanxi, Shaanxi and Inner Mongolia using remotely sensed data〔J〕. Research of Environmental Sciences, 2011, 14(6): 50 - 53.〕

〔21〕宋永永,薛东前,代兰海. 生态脆弱能源区人居环境与经济协调发展时空格局及演化机制——以晋陕蒙接壤区为例〔J〕. 干旱区地理, 2017, 40(6): 1 328 - 1 337.〔Song Yongyong, Xue Dongqian, Dai Lanhai. Spatial-temporal pattern and evolution mechanism of coordinated development of human settlement environment and economy in energy accumulation and vulnerable ecology regions: A case of contiguous areas among Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia〔J〕. Arid Land Geography, 2017, 40(6): 1 328 - 1 337.〕

Land Use Change and Its Effects on Ecological Response in Typical Fossil Energy Development Zones in Shanxi, Shaanxi and Inner Mongolia

SONG Yong-yong[1], XUE Dong-qian[1], DAI Lan-hai[1], XIA Si-you[2], HUANG Xiao-gang[1]

(1. *School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an* 710119, *Shaanxi, China*;

2. *School of Geography Science, Nanjing Normal University, Yingchuan* 210023, *Nanjing China*)

Abstract: Research on land use change and ecological response in typical fossil energy development zones is of significance in optimizing the land use pattern and improving the ecological quality. In this paper, a case study on land use change and its effects on ecological response in typical fossil energy development zones in Shanxi and Shaanxi provinces and Inner Mongolia Autonomous region was carried out based on RS and GIS. The purposes of the study were to acquire the land use data in 1995, 2000, 2005, 2010 and 2015 and analyze the characteristics of land use change and its ecological response by using the methods of transfer matrix of land use change and ecological response of land use transition. The results revealed that, during the period from 1995 to 2015, the areas of arable land and grassland were reduced by 676 km^2 and 1808 km^2, and those of forestland, residential land, waters and unused land were enlarged by 1 063 km^2, 966 km^2, 29 km^2 and 426 km^2, respectively. The land use was changed apparently with an inter-conversion of arable land, grassland and unused land. In recent 20 years, the value of regional ecosystem services was increased gradually with an increase of 1.86×10^{10} yuan RMB. Moreover, the contribution of forestland, grassland and waters was the most prominent. The overall quality of regional ecology was in an increasingly evolutionary trend at first and then decreasingly one during the period from 1995 to 2015. There were three evolutionary trends of environment quality in the study area, i. e. the deterioration, stability, and improvement. Among them, the area with stable environment quality was the largest and accounted for 57.08% of the total area, and the areas with deteriorated and improved environment quality accounted for 21.89% and 21.03% respectively. The degradation of waters, grassland and forestland was the leading factor in the deterioration of regional environment quality, and the conversion of arable land and unused land to grassland, forestland and waters, and of the conversion of grassland to forestland and waters were the important driving factors for the improvement of regional environment quality. Therefore, it is an important way to improve the environmental quality and achieve the sustainable development of the fossil energy development zones by strengthening the protection and management of forestland and grassland resources, rationally developing and utilizing the land and water resources, increasing the level of intensive use of arable land resources, and promoting the ecological restoration and land restoration in the new era.

Key words: land use; ecosystem service value; ecological response; fossil energy development zone